УДК 621.378:681.3.535

# АНАЛИЗ И ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ПРИНЦИПА СКАНИРОВАНИЯ ФАЗОВОГО ПРОСТРАНСТВА ОПТИЧЕСКИМ ФАЗОМЕТРОМ: 2. СЛЕДЯЩИЕ МИКРОРАСТРЫ

С.М. Слободян

Инновационный центр "ТЕСТ". г. Томск
E-mail: IC_Test@ inbox.ru

*Рассматривается возможность применения телевизионных принципов сканирования фазового пространства наблюдения для сопровождения объекта следящим оптическим фазометром. Проведен анализ различных траекторий следящего сканирования пространства. Описаны принципы практической реализации множества алгоритмов следящего сканирования микрорастром. Исследуется их эффективность и быстродействие.*

Интерференция поля, согласно интерферометрического метода, происходит между фрагментами наблюдаемого пространства, относящихся к разным точкам приемной оптической апертуры фазометра. Поэтому присутствующие на этих фрагментах фазовые искажения определяют структуру и общий вид поля картины интерференции в плоскости изображения. Считывание картин интерференции производится приемником изображения путем сканирования его элементом двумерного поля по выбранному алгоритму или траектории. Анализ и оптимизация телевизионного принципа и раз-

личных типов траекторий сканирования на этапе анализа и поиска объектов в виде структурных фазовых нарушений картины интерференции, проведен в [1]. Фильтрацию имеющихся в интерференционном поле фазовых искажений можно [2–5] осуществить управляемым внесением перекоса в плечи интерферометра, который приводит к изменению разности хода лучей и соответствующему изменению пространственной фазовой модуляции в картине интерференции. Формирование массива данных об интегральном и дифференциальном распределении изменений разности хода лучей (вариаций наклона волнового фронта), иллюстрирующих пространственную картину расположения фазовых искажений в поле интерференции известного опорного вида, дает информацию о координатах положения, форме объекта и локальных изменениях поля интерференции.

Настоящая работа посвящена анализу микрорастров – следящих траекторий сканирования для выделения локальных (вблизи или в области объекта) изменений или нарушения структуры фазового фронта волны.

Пространственное распределение энергии поля представляется в виде двумерно расположенных участков (элементов, ячеек) $\Delta$, составляющих непрерывное, всюду плотное, множество *H*. Положение каждого элементарного участка определяется числами (*M*, *N*) или порядковыми номерами $M\times N$, либо координатами в выбранной системе (декартовой, полярной и т.п.). То есть, для *i*-ого элемента $x=(x_1,x_2,...,x_n)$. Для дискретного поля, состоящего из элементов (ячеек) конечного размера, общее количество элементов, например, в двумерном поле $M\times N$, ограничено. Тогда множество *H* – конечно. Для непрерывного поля $\Delta\to 0$ ($M\times N\to\infty$) множество *H* – бесконечно.

В оптических фазометрах, выполненных по схеме измерительной системы с обратной связью [3–6], упрощенная структурная схема которой в режиме слежения приведена на рис. 1, *б*, для контроля перемещения объекта и измерения его координат применяют разные способы формирования следящего сканирования. Вырабатываемые в режиме слежения управляющие сигналы $i_x$ и $i_y$ перемещают элемент (в плоскости изображения – объект) по некоторой траектории, определяемой их законом изменения. Совокупность траекторий перемещения элемента сканирования образует следящий микрорастр (МР). Размеры следящего МР (на рис. 1, *б*, они увеличены), независимо от его вида, обычно соизмеримы с размерами объекта и составляют десятые – тысячные доли линейных размеров углового поля наблюдаемого фазометром пространства. Это позволяет сузить поле фазометра до угловых размеров объекта, повышая таким образом точность определения координат и помехозащищенность фазометра в режиме слежения.

Как показано в [2], интерферометрический метод требует обеспечения малых ошибок слежения из-за присущей методу ярко выраженной зависимости регистрируемой интерферограммы от угла $\beta$ между нормалью *n* к приемной апертуре и линией $OO_2$ визирования объекта (рис. 1, *а*). Вводя вектор $r_0$, характеризующий ошибку слежения, и следуя обозначениям рис. 1, *а*, можно записать соотношение: $r_0=r-r'$ (где $r'$ – радиус-вектор, отсчитываемый от некоторой точки $O_2$ объекта наблюдения, удаленного на расстоянии *L*). Для достаточно малых углов: $\beta\sim r_0/L$ или $r_0\sim\beta L+r'$. В случае сканирования полного поля [1] необходимо учитывать изменения угла $\beta$ за $T_k$ – время сканирования кадра. То есть, $\beta(T_k)$, $L(T_k)$ и ошибка слежения могут быть значительны. При переходе в режим слежения с МР величины $\beta$ и *L* практически остаются постоянными за весьма малой интервал оценки координат объекта (состояния фазового фронта). Интервал оценки в режиме слежения с МР в $T_k/T_{мр}$ ($T_{мр}$ – цикл МР) меньше, чем на этапе поиска.

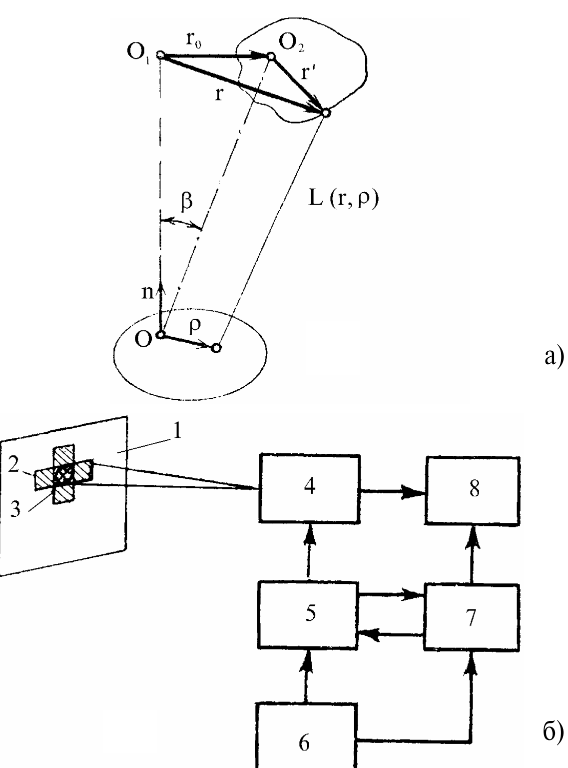



**Рис. 1.** *Принцип сопровождения объекта в пространстве (а) и упрощенная структура оптического фазометра (б): 1) поле пространства наблюдения; 2) следящий растр; 3) объект; 4) блок фотоприемника с управляемой оптикой; 5) блок управления следящим сканированием; 6) генератор опорных сигналов; 7) блок оценки рассогласования и формирования координат; 8) блок обработки видеосигнала*

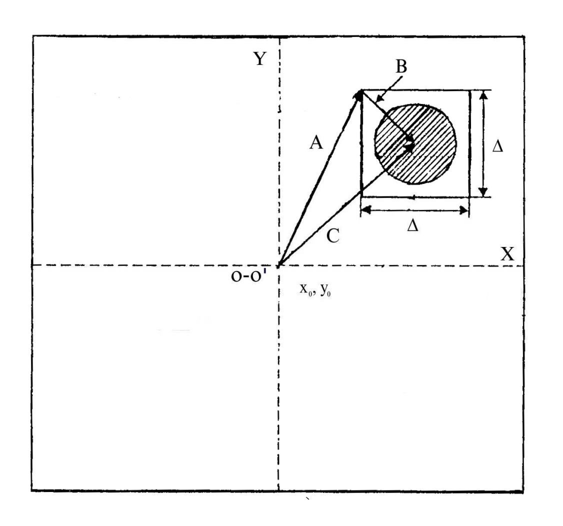
Основной принцип локационной системы – приведение объекта к центру поля пространства наблюдения и обеспечение равенства нулю угла $\beta$, при котором вектор *n* направлен на объект. Из-за движения объекта и влияния возмущающих воздействий, не всегда удается удерживать объект в центре поля – системы координат. Тогда, угол $\beta$ является ошибкой слежения или сопровождения

объекта. В плоскости XY системы координат приемника он определяется рассогласованием $\Delta x$ и $\Delta y$. То есть, $\beta$ есть функция ($\Delta x, \Delta y$). Наличие ошибки сопровождения объекта объясняется дополнительной пространственной фазовой модуляцией $\Delta\phi(x,y)$ поля излучения на приемной апертуре, обусловленной локальными наклонами на угол $\beta$ фазы волнового фронта отраженной или принимаемой от объекта волны. Следящий МР формируется в малой области поля, прилегающей в точке нахождения объекта, и может находиться в любом месте поля в зависимости от положения объекта при обнаружении.

Для формирования МР в фазометрах телевизионного типа часто [1–10] используют пьезоэлектрические приводы управления фронтом волны излучения. Несомненным достоинством пьезоэлементов является их принципиальная способность изменять форму и длину в диапазоне от десятков мкм до долей Å в интервале управляющих напряжений от сотен В до десятков мкВ. Современный уровень электроники позволяет реализовать изменение управляющих напряжений на пьезоэлементе в двадцатикратном логарифмическом двоичном масштабе. Функционально пьезопозиционеры обеспечивают осуществление различных траекторий МР, описанию и анализу которых посвящена настоящая работа, путем сканирования фазового пространства. Однако, физические свойства пьезоэлементов, такие как [10] нелинейная зависимость перемещения от управляющего потенциала, "*creep*", логарифмически зависящий от времени и предыстории перемещения и проявляющейся в виде ползучести, последействия, дрейфа положения, гистерезиса, определяют неповторимость пьезоэлементов привода управления фазой. Эти факторы ограничивают предельно достигаемую приводом точность позиционирования. Большинство из перечисленных проявлений устраняется конструктивными или алгоритмическими методами коррекции [7–10].

По мере движения объекта следящий МР перемещается так, чтобы изображение объекта (ИО) оставалось в его центре. Снимаемый с выхода фотоприемника фазометра видеосигнал несет информацию об относительном положении ИО и МР.

Сопровождение объекта достигается тем, что, получая информацию на основе оценки рассогласования и формирования координат, вырабатывается управляющий сигнал, пропорциональный отклонению центров объекта и МР. Этот сигнал через цепь обратной связи управляет объектом или МР. При этом центр МР непрерывно совмещается с центром ИО на фотоприемнике, и напряжения управляющих сигналов дают информацию о координатах $x$ и $y$ центра ИО. Слежение в фазометре может осуществляться за энергетическим или геометрическим центром ИО. При симметричном относительно геометрического центра распределении плотности потока в ИО фазометр выдает пространственные координаты положения общего (геометрического и энергетического) центра объекта.



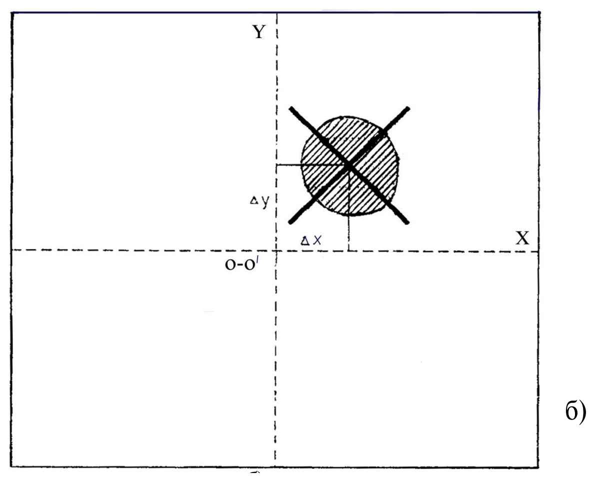




**Рис. 2.** *Оценка координат объекта фазометром методами следящих: а) строба и б) МР*

В фазометре со следящим стробом сканирование ИО проводится телевизионным растром [1] по всему полю пространства. Слежение за объектом осуществляется специальным следящим окном (размера $\Delta\times\Delta$) – "двумерным стробом". При перемещении объекта строб перемещается вместе с его ИО под воздействием сигналов следящего контура, накрывая его в каждом кадре. Обработка изображения, выделение рассогласования между центрами ИО и строба и его отработка следящим контуром производится в пределах строба (рис. 2, *а*). На начальном этапе строб совмещается с ИО, накрывая его. Фазометр обрабатывает подмножество точек изображения $\Delta\times\Delta = M\times N$.

Координаты объекта вычисляются следующим образом. На первом этапе формируется строб. Координаты его верхнего левого угла задаются априори, либо экстраполируются с $i$ на $i$+1 кадр оценки. На рис. 2, *а*, это вектор *A*. Затем вычисляются координаты центра ИО внутри строба – вектор *B*. Величина истинных координат объекта определяется по правилу суммирования – вектором *C*. Внутренний следящий контур фазометра определяет точные координаты ИО в пределах строба и делает прогноз оценки его координат с $k$ на $k$+1 кадр.

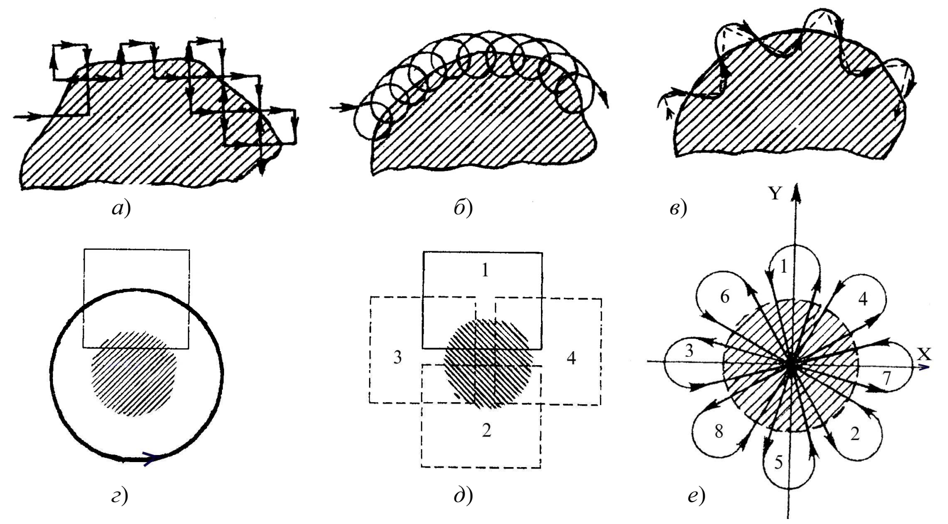



***Рис. 3.*** *Принцип: а) шагового, б) кругового, в) контурного следящего сканирования; г) кольцевого, д) релейного, е) розеточного следящего микрорастра. Направление сканирования показано стрелками и цифрами*

При слежении за "протяженными" объектами часто используют контурное и растровое следящее сканирование. Виды контурного сканирования: шаговое, круговое и радиус-векторное приведены на рис. 3, *а–в*. В случае шагового сканирования элемент движется вдоль контура объекта малыми шагами. Каждый последующий шаг ортогонален предыдущему. Обход контура совершается по часовой стрелке, рис. 3, *а*. В случае круговой траектории элемент, двигаясь, совершает круговые (рис. 3, *б*) или полукруговые (рис. 3, *в*) движения вдоль границы объекта.

Недостаток этих траекторий – относительная сложность построения фазометра. Более простое построение фазометра при [6] кольцевом (рис. 3, *г*) или радиус-векторном сканировании, получаемом путем формирования синусоидальных напряжений, сдвинутых на 90°, с последующим их перемножением на видеосигнал. Радиус-векторное сканирование дает более высокую точность и быстродействие. Если шаговые релейные (рис. 3, *д*) и круговые (рис. 3, *г*) алгоритмы обеспечивают слежение за контуром практически любой формы, то радиус-векторные – только за однозначными контурами объектов. Однозначным контуром считается такой, в проекции изображения которого есть точка, такая, что, направленный из нее радиус-вектор в любую точку изображения пересекает контур один раз. Например: круг, звезда, прямоугольник и т.д.

Растровое следящее сканирование ограничивается контуром ИО. При слежении за малоразмерными или точечными объектами с дифракционно-ограниченными ИО применяют розеточное и крестообразное сканирование. Рассмотрим кратко эти принципы сканирования.

**Розеточное следящее сканирование.** Принцип формирования следящего розеточного МР (рис. 3, *е*) заключается в амплитудной модуляции двумя сдвинутыми по фазе на 90° синусоидальными сигналами с угловыми частотами $\omega_0$ и $n_p\omega_0$ [1, 6], подаваемыми на двухкоординатную систему управления элементом сканирования. Время формирования одного лепестка "розетки" $T_{p1}=2\pi/n_p\omega_0$. Полный растр розетки формируется за время $T_p=2\pi/\omega_0$. Выбором соотношения частот модуляции $\omega_0$ и управляющего колебания $n_p\omega_0$ формируется *n*-лепестковый розеточный МР. Известно [1, 6] применение многолепестковой (32, 128 и более) розетки. Для повышения точности в режиме слежения формируется розеточный МР с меньшим числом лепестков (8, 12, 16). Из-за неизбежно возникающих в процессе модуляции нелинейных искажений сигнала, сложности формирования сигнала управляющего розеточным растром и нелинейности сканирования, лучшие результаты при малоразмерном объекте дают крестообразные МР.

**Крестообразное следящее сканирование.** Существует множество способов получения крестообразных МР, отличающихся числом рабочих ходов сканирования, пространственной ориентацией, направлением обхода траектории крестообразного МР и т.п. В зависимости от конкретного назначения фазометра применяется та или иная модификация крестообразного МР из приведенных на (рис. 4, *а–и*): *двухходовой крест* (рис. 4, *а*); *двухходовой диагональный крест* (рис. 4, *б*) представляет собой обычный *двухходовой растр*, развернутый относительно координатных осей на угол 45°; *четырехходовой центрированный крест* (рис. 4, *в*); *четырехшаговый точечный крест* (рис. 4, *г*) – скорость перехода элемента в крайние точки этого МР ограничена постоянной времени пьезопривода.

Общим недостатком рассмотренных траекторий крестообразных МР является короткий обратный ход сканирования, для осуществления которого необходимо обеспечить широкую полосу пропускания пьезопривода. Пьезоприводы при резонансной частоте 40 МГц имеют постоянную времени порядка $10^{-7}$ с. Кроме того, для рассматриваемых МР характерно внесение погрешности в положение объекта гистерезисом пьезоэлементов.

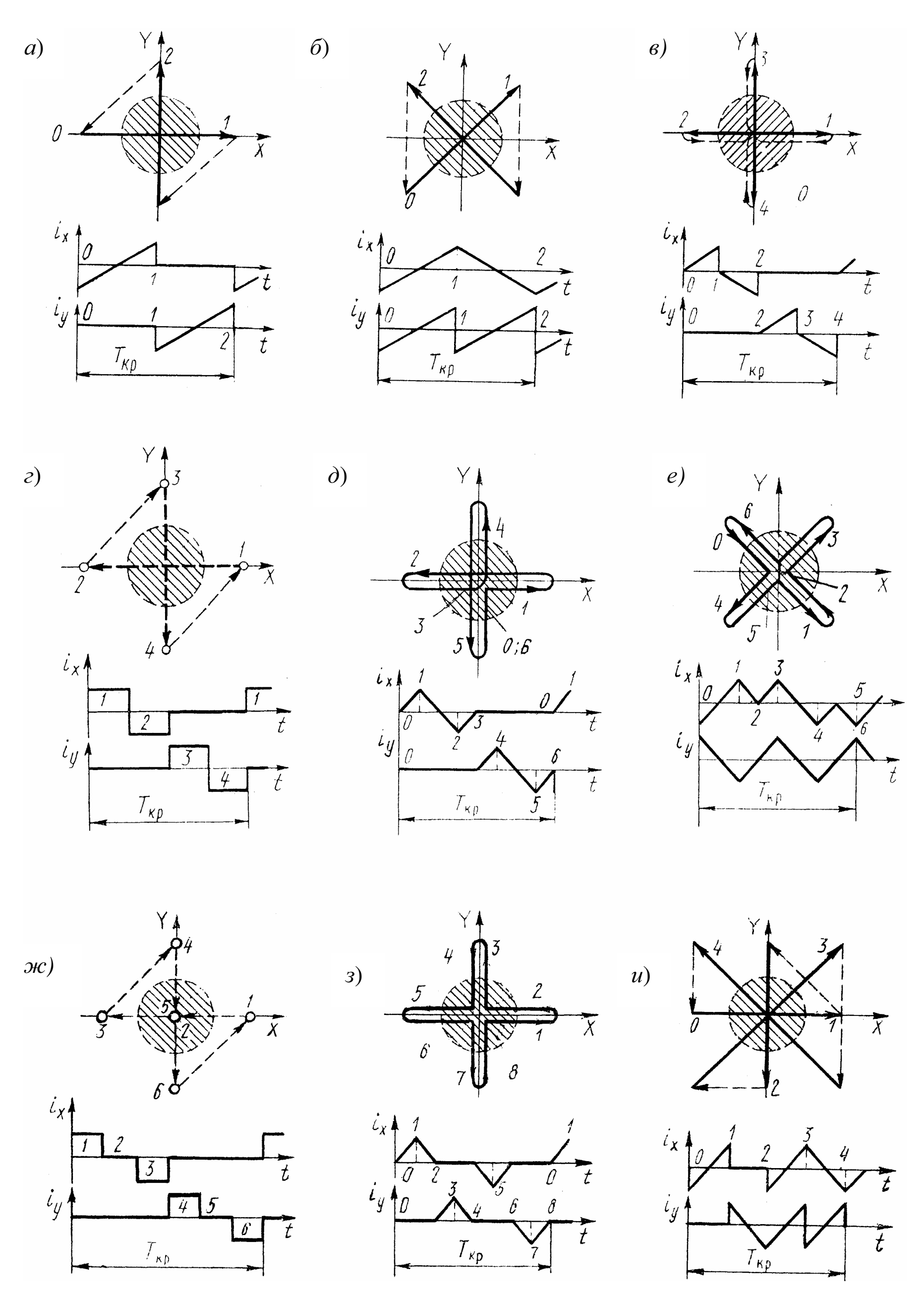


**Рис. 4.** *Иллюстрация крестообразных следящих микрорастров: а) двухходовой; б) двухходовой диагональный; в) четырехходовой центрированный; г) четырехшаговый точечный; д) шестиходовой; е) шестиходовой диагональный; ж) шестишаговый точечный; з) восьмиходовой; и) четырехходовой восьмилучевой. Цифрами 0, 1, ..., 8 показаны узловые точки МР; объект заштрихован; вид управляющих сигналов приведен под каждым из МР*

Повышение быстродействия следящих фазометров достигается применением крестообразных МР, имеющих рабочие обратные ходы (например, шести- и восьмиходового МР); *шестиходовой крест* (рис. 4, *д*); *шестиходовой диагональный крест* (рис. 4, *е*); *шестишаговый точечный крест* (рис. 4, *ж*); *восьмиходовой крест* (рис. 4, *з*).

Общий недостаток этих крестообразных следящих МР – пониженная скорость слежения за объектом, направление движение которого совпадает с биссектрисой угла, образованного рабочими ходами МР.

*Четырехходовой восьмилучевой крест* (рис. 4, *и*) лишен этого недостатка, т.к. он обеспечивает повышенную скорость слежения за объектом, малозависящую от направления его движения. Полный период этого типа МР равен четырем длительностям рабочих ходов сканирования.

Рассмотренным МР присуща (рис. 5, *а*) значительная анизотропия векторного распределения поля максимальных скоростей слежения за перемещением. Наибольшие значения вектора скорости смещения объекта соответствуют направлениям сканирования МР; наименьшие – в направлении биссектрис углов, образованных ходами сканирования. Увеличение дисперсии помех воздействия не меняет общей картины распределения поля скоростей слежения.

Все типы крестообразных МР формируются как при непрерывном (аналоговое сканирование), так и при шаговом сканировании (цифровые МР). Релейные и шаговые МР применяют в фазометрах цифрового и аналогового типов. Они облегчают реализацию многих алгоритмов обработки сигнала и слежение за объектом с помощью микропроцессоров и устройств цифровой и компьютерной техники. Крестообразные МР применяются для слежения за точечным и протяженным объектами и обеспечивают высокую точность определения координат благодаря дифференциальному способу выделения сигнала рассогласования. Этот сигнал формируется [6] путем сравнения длительности видеоимпульсов, соответствующих каждой четверти полного МР. Для повышения помехозащищенности фазометров при слежении за близкорасположенными объектами крестообразный МР вписывается [5] в контур объекта. Для одиночного объекта оптимальный размер МР превышает размер ИО.

При сканировании МР видеосигнал представляет собой смесь полезного сигнала, несущего информацию о форме и координатах ИО, и шума:

$$Z(x,y,t) = A(t)\exp(-\{[(x-x_0)^2/d_x^2]+$$
$$+[(y-y_0)^2/d_y^2]\}/2)+n_ш(x,y,t),$$

где $A(t)$ – амплитуда; $x_0$, $y_0$ – координаты центра объекта; $d_x$, $d_y$ – размеры ИО на выбранном уровне; $n_ш(x,y,t)$ – в общем случае, нестационарный шум фотоприемника.

При релейном МР [6]:

$$Z(x,y,t)=\begin{cases} A_1(x,y,t), & t\le T/4; \\ A_2(x,y,t), & T/4\le t\le T/2; \\ A_3(x,y,t), & T/2\le t\le 3T/4; \\ A_4(x,y,t), & 3T/4\le t\le T, \end{cases}$$

где $A_i(x,y,t)$ – амплитуда сигнала в $i$-ом положении элемента ($i=1, 2, 3, 4$).

При круговом сканировании видеосигнал имеет вид [4–6]:

$$Z(\Delta\rho,\varphi,\ t)=A(\Delta\rho,\varphi,\ t)\times$$
$$\times[1+m\cdot\Delta\rho\cdot\cos(\omega t+\varphi)]+n_ш(\Delta\rho,\varphi,\ t),$$

где $A(\Delta\rho,\varphi,t)$ – амплитуда сигнала; $m$ – коэффициент модуляции как степень покрытия элементом ИО, равный площади их перекрытия; $\Delta\rho$ – величина рассогласования центров МР и ИО; $\omega$ – частота следящего МР; $\varphi=\mathrm{arctg}(\Delta y/\Delta x)$ – угол рассогласования центров.

При использовании в фазометре приборов с зарядовой связью (ПЗС) видеосигнал является результатом свертки функции освещенности оптического поля и элемента ПЗС:

$$Z(x,y,t)=\sum_i^N\sum_j^M Z_i(t+iT_i)\times$$
$$\times\iint_\Delta E_0(x,y,x_0,y_0)\,A(x_0,y_0)\,dx\,dy,$$

где $i$, $j$ – порядковые номера элементов по строкам и столбцам; $Z_i(t)$ – сигнал с $i$-ого элемента ПЗС размером $\Delta\times\Delta$; $E_0(x,y)$ – функция освещенности ИО; $T_i$ – время считывания заряда с элемента; $A(x_0,y_0)$ – апертура элемента ПЗС. То есть, форма сигнала определяется размерами элемента ПЗС и объекта, распределением освещенности в ИО. Для элемента размером 12...20 мкм ИО на ПЗС не превышает 3–4 элементов. Тогда, при считывании с $i,j$-ого элемента видеосигнал имеет вид: $Z_{ij}=S_{ij}+n_{ij}$, где $S_{ij}$ – сигнал, соответствующий освещенности элемента, и $n_{ij}$ – гауссов шум, удовлетворяющий условиям: $\{\overline{n_{0ij}}\}=0$, $i=1,N$; $j=1,M$ и $\{\overline{n_{0ij}n_{0kl}}\}=\{0$, при $i\ne k$, $j\ne 1$ и $\sigma_0^2$, при $i=k$, $j=1\}$, где $\sigma_0^2$ – дисперсия шума; черта – усреднение.

Ошибка рассогласования связана с временным рассогласованием положения видеосигнала (максимума интерференции) относительно центра МР. Устойчивому режиму слежения в оптических фазометрах контроля перемещения [3–5, 10] соответствует некоторая скоростная динамическая ошибка оценки координат, обусловленная дискретностью цикла контроля и динамикой движения объекта. При установившемся значении $\Delta_x$ динамической ошибки слежения за движущимся со средней скоростью $\upsilon_0$ объекта, не выходящей за пределы линейного участка временного или фазового дискриминатора следящего фазометра, справедливо соотношение

$$\Delta_x=\upsilon_0\,T_{мр}/nK_\upsilon,$$

где $T_{мр}/n$ – периодичность цикла оценки данной координаты; $n$ – число циклов оценки координаты за полный цикл МР размером $l_{мр}$ и $K_\upsilon$ – коэффициент передачи разомкнутого контура следящего фазометра [4, 5] или измерительной системы с обратной связью [10]. Если зависимость коэффициента передачи разомкнутого контура фазометра от скорости перемещения полосы интерференции представить в виде [6]

$$K_\upsilon=K_{\upsilon_0}(1-\upsilon_0\cdot\upsilon_{мр}^{-1}),\ K_\upsilon=K_{\upsilon_0}\ (\text{при}\ \upsilon_{мр}\to\infty),$$

то решение этого уравнения по условию наступления срыва слежения или перехода фазометра в область состояния перемежаемости и детерминированного хаоса при превышении ошибки $\Delta_x$ половины размера $d_э$ элемента или самого фотоприемника (для $n=2$ и $l_{мр}=2d_э$) представлено на рис. 5, *б*.

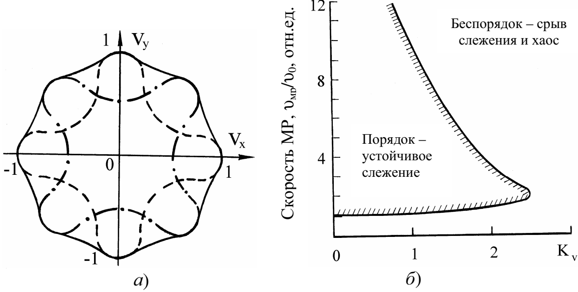



***Рис. 5.*** *Распределение поля скоростей слежения (а) и влияние скорости (б) на устойчивость следящего фазометра*

Из условия срыва слежения $n$-ходового МР при $\Delta_x=d_э/2$ получим критическое значение относительной скорости сканирования $\upsilon_{мр}/\upsilon_0\geq(1+2nl_{мр}/K_{\upsilon_0}d_э)$, которое определяет область устойчивой работы следящего фазометра. Для относительного размера МР порядка $nl_{мр}/d_э$=2...4 относительная скорость сканирования при $K_{\upsilon_0}$ = 2 должна в 5...17 раз, а при $K_{\upsilon_0}$ = 4 – в 3...9 раз превышать скорость перемещения объекта контроля.

Для гауссовской формы распределения плотности интенсивности изображения малого контраста $K_0$<<1 и стохастического гауссовского сигнала с независимыми значениями и нулевым средним – процесса, удовлетворяющего условию сильного перемешивания, с корреляционной функцией марковского-стационарного центрированного сигнала интенсивности $\lambda>0$ $B(\tau)=\sigma^2\exp(-\lambda|\tau|)$, найдем, что оптимальное значение соотношения скоростей, обеспечивающее при оптимальном коэффициенте передачи контура минимум дисперсии суммарной (динамическая плюс флуктуационная) погрешности оценки координат, определится выражением

$$\upsilon_{мр}/\upsilon_0=(K_\upsilon^2 l_{мр}d_э/2\upsilon_0)^{1/2}/\psi_{сл},$$

где $\psi_{сл}$ – отношение сигнал/шум. Отсюда, для $l_{мр}=(3...4)d$ соотношение $\upsilon_{мр}/\upsilon_0$ составит порядка 6...8. Такой же порядок этой величины находится из условия минимума вероятности срыва слежения и перехода в область хаоса [6].

В заключение отметим общность алгоритмов работы следящих фазометров на основе принципа телевизионного сканирования фазового пространства, в которых слежение осуществляется совмещением с ИО крестообразного МР. Последовательность ходов МР определяется алгоритмом управления сканированием. Видеоимпульсы фотоприемника разделяются схемами коммутации по четырем каналам при сканировании от центра: 1) X – вправо; 2) X – влево; 3) Y – вверх; 4) Y – вниз. Коммутация и управление сканированием синхронизированы так, чтобы по каждому каналу проходили видеоимпульсы соответствующей ветви МР. При этом импульсы, полученные при сканировании в противоположных относительно центра ветвях МР, имеют разную полярность, например, за счет опорных сигналов, по длительности и полярности совпадающих с сигналами следящего сканирования. При смещении центров МР и объекта эти импульсы отличаются по длительности, обусловливая появление сигнала рассогласования, абсолютное значение и знак которого однозначно отражают смещение объекта. Усредненные за период сигналы дают информацию о координатах X и Y центров МР и объекта относительно оптической оси фазометра. Оптимальная скорость МР, обеспечивающая устойчивую работу следящего фазометра, должна в 6...8 раз превышать скорость изменения динамики процесса и объекта контроля. Принципиально пьезоприводы следящих фазометров [7–10] обеспечивают скорость слежения за изменением фазы волнового фронта до $10^6...10^8$ мкм/с.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Слободян С.М. Анализ и оптимизация телевизионного принципа сканирования фазового пространства оптическим фазометром: 1. Поисковые траектории // Известия Томского политехнического университета. – 2004. – Т. 307. – № 6. – С. 17–24.
2. Устинов Н.Д., Матвеев И.Н., Протопопов В.В. Методы обработки оптических полей в лазерной локации. – М.: Наука, 1983. – 272 с.
3. Слободян С.М. Диссекторные гетеродинные системы // Зарубежная радиоэлектроника. – 1986. – № 6. – С. 62–72.
4. Слободян С.М. Следящий оптический фазометр // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 6. – С. 101–106.
5. Слободян С.М. Метод фазового слежения в гетеродинном интерферометре контроля перемещений // Измерительная техника. Метрология. – 2004. – № 2. – С. 14–27.
6. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. – М.: Радио и связь, 1984. – 136 с.
7. Слободян С.М. Многомернокоординатный привод микроуправления // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 92–95.
8. Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопривод // Датчики и системы. – 2003. – № 3. – С. 47–48.
9. Слободян М.С., Слободян С.М. Трехкоординатный пьезопривод // Известия вузов. Приборостроение. – 2004. – Т. 47. – № 1. – С. 32–36.
10. Слободян С.М. Оптимизация биморфного привода оптических измерительных систем с обратной связью // Измерительная техника. – 2003. – № 1. – С. 19–23.